

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE CORRELAÇÃO ENTRE COMPORTAMENTO DINÂMICO DO VEÍCULO FERROVIÁRIO E INDICADORES DE SEGURANÇA

Rodrigo de Castro Baker Botelho
rbbotelho@gmail.com

Prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa
spinola@usp.br

Resumo: O presente artigo apresenta um estudo sobre a dinâmica de um veículo ferroviário sujeito às forças laterais em curva e busca identificar parâmetros do veículo que possam ser correlacionados a um índice de segurança e assim prever a ocorrência do fenômeno de descarrilamento. A partir de um modelo bidimensional do veículo em conjunto com um modelo proposto por (Barbosa, 1996), são considerados os graus de liberdade relativos a rotação em torno do eixo Z e deslocamento no eixo y. Em seguida o modelo é submetido a uma entrada que simula o percurso de uma curva. Os resultados da simulação são utilizados para identificar os possíveis parâmetros do veículo que possam ser medidos por um sensor e que demonstrem relação causa-efeito. Ao final, uma proposta de posicionamento dos sensores no veículo é feita juntamente com uma análise do modelo utilizado, evidenciando possíveis melhorias do modelo.

Palavras chave: descarrilamento, trem, comportamento, dinâmico, segurança

1. Introdução

O meio de transporte ferroviário tem sido objeto de estudo de diversas áreas. Seja pela sua alta capacidade de transporte de materiais seja pela sua utilização como meio de transporte de passageiros em grandes centros, entender os fenômenos relativos a ele pode ajudar a prever situações de risco e assim evitá-las. Dessa forma, o presente artigo apresenta um estudo sobre parâmetros do veículo que possam ajudar na prevenção do descarrilamento quando em *wheel climbing*.

O fenômeno de descarrilamento é definido como a perda de guia lateral do veículo na interface roda-trilho. Diversas são as origens do fenômeno. Ele pode ter origem na mudança de bitola da via, imperfeições no trilho, a partir de transferência de massa dentro do veículo ou ainda, tema do presente trabalho, quando as forças laterais são tamanhas que a roda se desloca verticalmente ultrapassando o trilho. Este fenômeno é conhecido como *wheel climbing*.

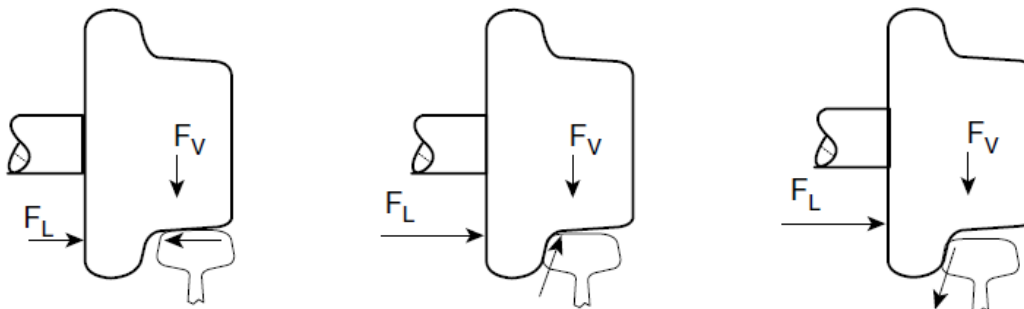


Figura 1. Processo de descarrilamento por *wheel climb*.

A figura acima ilustra as forças atuantes na roda para um percurso em curva quando em processo de descarrilamento. A primeira parte do processo é o deslocamento lateral do rodeiro. Em seguida, a flange entra em contato com o trilho. Caso as forças laterais continuem aumentando, há um processo de subida da roda devido ao contato entre trilhos e rodas. A força lateral gera uma força normal ao ponto de contato que, em conjunto com o atrito no contato, possui uma parcela na direção vertical. Caso esta seja maior que a força vertical, ocasiona numa subida do rodeiro e acaba por ultrapassar o trilho causando o descarrilamento.

Segundo C. Hung et alii (2010), a detecção de uma situação de risco pode ser feita a partir da verificação de dois parâmetros. Eles são a velocidade de mergulho do veículo em conjunto com a velocidade média de capotamento que, uma vez medidos, são utilizados para verificação segundo valores limites.

A proposta deste trabalho é investigar, a partir de um modelo bidimensional, a existência de outro parâmetro que possa ser correlacionado a um índice de segurança. Um vez identificado, utilizá-lo como medida a fim de detectar a possibilidade

de ocorrência do fenômeno. Para tanto, um modelo contendo quatro rodeiros, dois truques e uma caixa, totalizando 14 g.d.l., foi proposto e utilizado para tal análise.

2. Estado da Arte

Entre as recentes pesquisas feitas na área, destaca-se o estudo sobre descarrilamento a pequenas velocidades feito por C. Hung et ali (2010). Neste, propõe-se uma técnica de detecção de alguns sinais do veículo que, segundo os autores, estão correlacionados ao princípio do descarrilamento. Para isso, foi utilizado um modelo matemático de um trem composto por dois truques com duas rodas cada, e ainda um experimento com modelo em escala. Os resultados foram comparados e propõe-se, então, um algoritmo de detecção. O algoritmo leva em conta um pico máximo de *pitch* e a média da velocidade angular de rolagem.

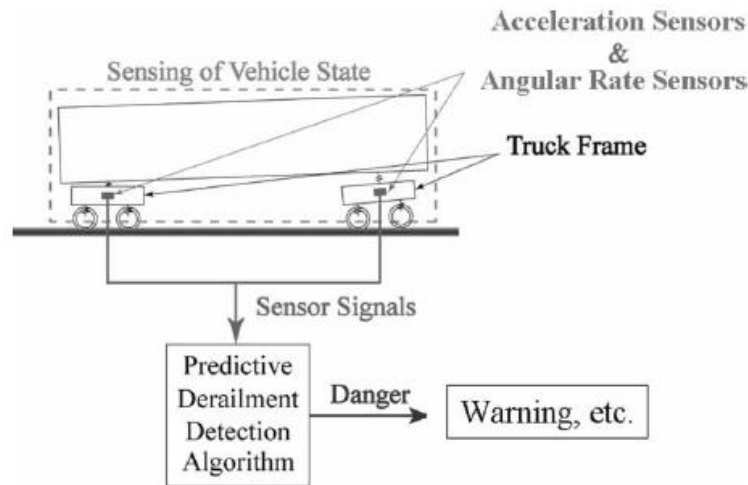


Figura 2. Algoritmo proposto por C. Hung.

3. Modelo

O vagão de trem pode ter diversas configurações. O número de rodas pode variar, sendo possível encontrar de uma a três rodas por truque. Além disso, o acoplamento entre rodas e truque, truque e truque, e truques e vagão pode assumir as mais diferentes formas. Entre elas está a do presente trabalho, contando com um baú, onde são transportadas as pessoas ou mercadorias, dois truques com duas rodas cada, totalizando quatro rodas.

O acoplamento entre roda e rodeiro se dá segundo modelo proposto por (Barbosa, 1996). O restante dos acoplamentos considerados são de molas e amortecedores lineares no eixo Y, além de molas torcionais no eixo Z, representando assim a suspensão primária e secundária do veículo.

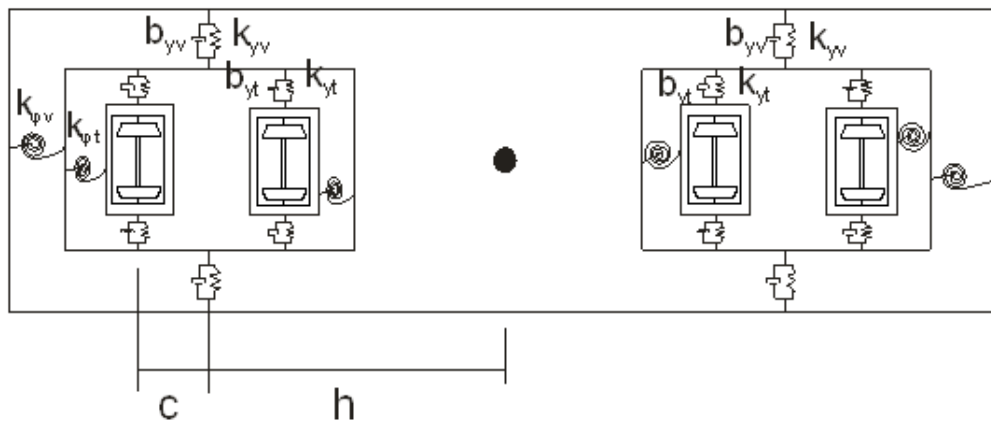


Figura 3. Vista de topo de um vagão. Modelo usado para simulação do veículo ferroviário

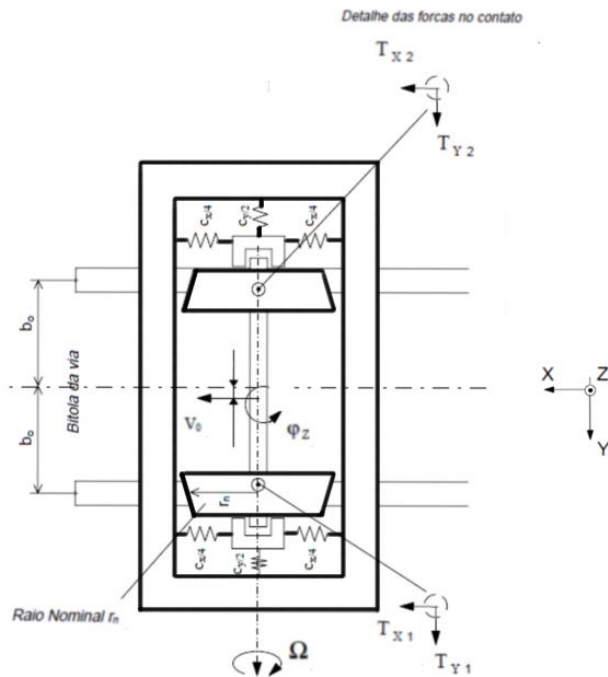


Figura 4. Detalhe do modelo do rodeiro ferroviário.

Algumas hipóteses foram assumidas no modelo. Efeitos presentes nas outras direções não foram considerados. Tal consideração tornaria a investigação dificultosa sem a certeza de trazer benefícios para identificação dos parâmetros. Além disso, a geometria das suspensões foi desconsiderada e as suspensões foram consideradas lineares. O veículo foi considerado inteiramente rígido e deslocando-se em velocidade constante na direção do eixo X. O baricentro de cada parte foi adotado em seu centro, nenhum efeito de transferência de massa foi considerado e a conicidade da roda foi adotada como constante.

O veículo ferroviário foi então submetido às solicitações internas e externas originadas durante a inscrição de uma curva de raio R. Nos rodeiros, elas são compostas de duas parcelas: uma força interna relativa à aceleração centrípeta e um momento externo produzido pela velocidade angular de regime. Nos truques e no baú, existe apenas a parcela relativa à força centrípeta.

Inscrição em curva

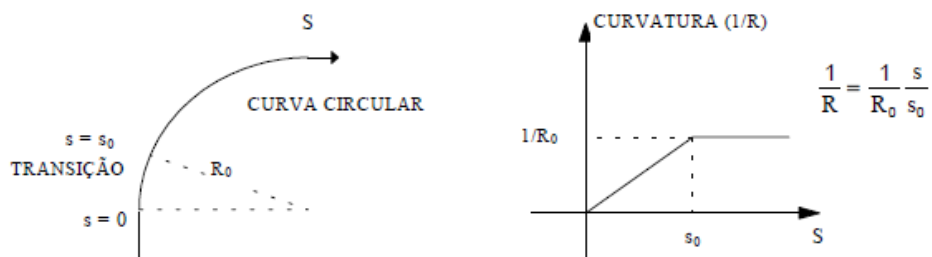


Figura 5. Inscrição linear em curva

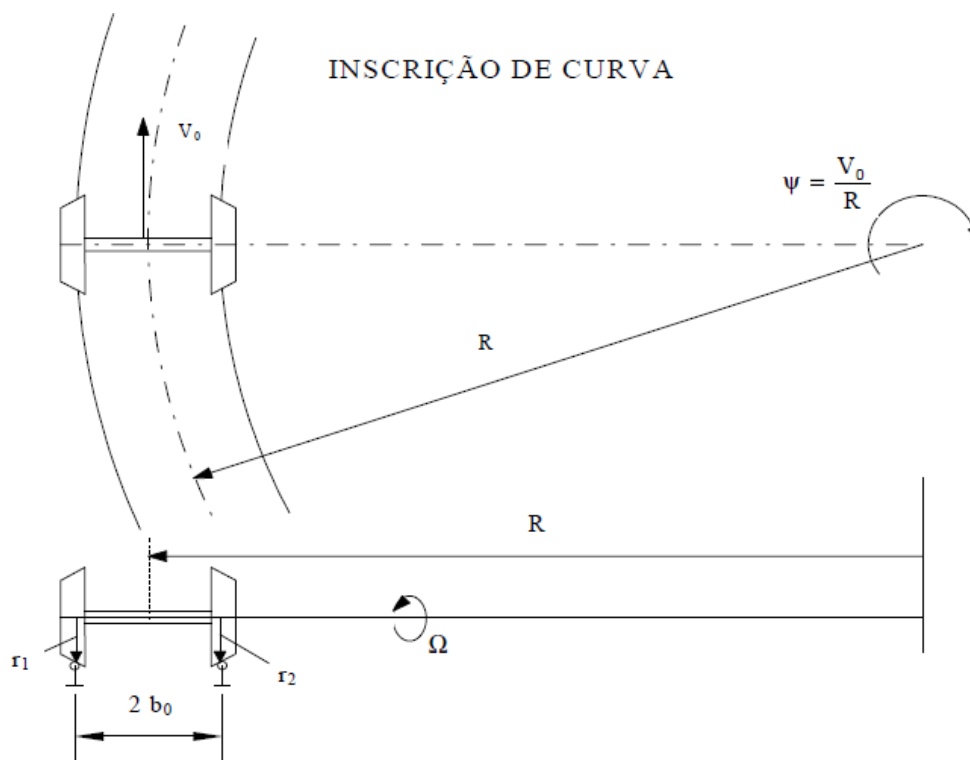


Figura 6. Representação da curva e momento externo resultante.

4. Simulação

O modelo acima descrito foi inteiramente equacionado de forma manual. Após a obtenção das equações, o sistema foi então simulado usando o software MATLAB® e sua ferramenta para sistemas, SIMULINK®.

Como pode ser visto anteriormente, a entrada do sistema se dá pela inserção do veículo em uma curva com raio variável. Inicialmente o veículo percorre um trecho de reta. Em seguida começa a curva de forma suave, com variação linear da curvatura, variando de zero a $1/R_0$, sendo R_0 o raio final da curva.

Os demais parâmetros do veículo podem ser visualizados na tabela abaixo.

Tabela 1. Características do veículo ferroviário.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Conicidade da roda	λ	0,10
Raio nominal da roda (m)	r_0	0,4572
Bitola da via (m)	b_0	0,7175
Semi-distância da suspensão primária (m)	e_0	0,61
Massa do rodeiro (kg)	m_r	1715
Massa do truque (kg)	m_t	2500
Semi comprimento do truque (m)	c	1,25
Massa do Vagão (kg)	m_v	22000
Semi comprimento do vagão (m)	h	8,75
Momento de inércia do rodeiro (kg.m^2)	I_r	800
Momento de inércia do truque (kg.m^2)	I_t	3500
Momento de inércia do vagão (kg.m^2)	I_v	10^6
Rigidez longitudinal do contato (N)	k_x	$6,2 \cdot 10^6$
Rigidez lateral do contato (N)	k_y	$6,5 \cdot 10^6$
Rigidez longitudinal da suspensão do rodeiro (N/m)	c_x	$4,5687 \cdot 10^6$
Rigidez lateral da suspensão do rodeiro (N/m)	c_y	10^2

Rigidez lateral da suspensão primária (N/m)	k_{yt}	4.10^5
Amortecimento lateral da suspensão primária (N.s/m)	b_{vt}	6.10^4
Rigidez torcional da suspensão primária (N/rad)	k_{ft}	4.10^7
Rigidez lateral da suspensão secundária (N/m)	k_{yv}	$4,5.10^7$
Amortecimento lateral da suspensão secundária (N.s/m)	b_{yv}	6.10^4
Rigidez torcional da suspensão secundária (N/rad)	k_{fv}	10^7

5. Resultados

A seguir estão ilustrados os resultados obtidos para esta simulação considerando as seguintes características:

Tabela 2. Parâmetros utilizados na simulação.

Velocidade do veículo	10 m/s
Varição da curvatura	$s=0,02$
Raio máximo de curva	2500 m

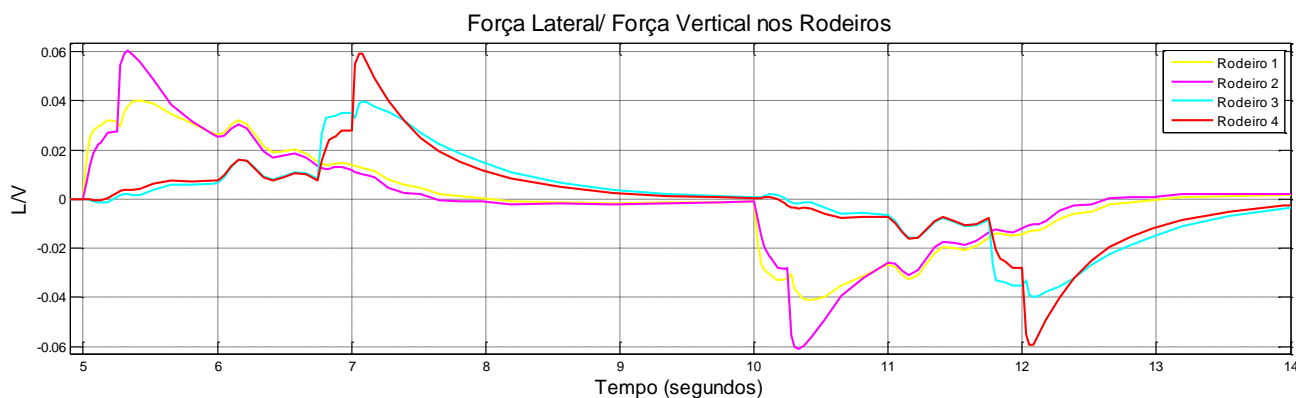


Figura 7. Força Lateral/ Força Vertical dos rodeiros.

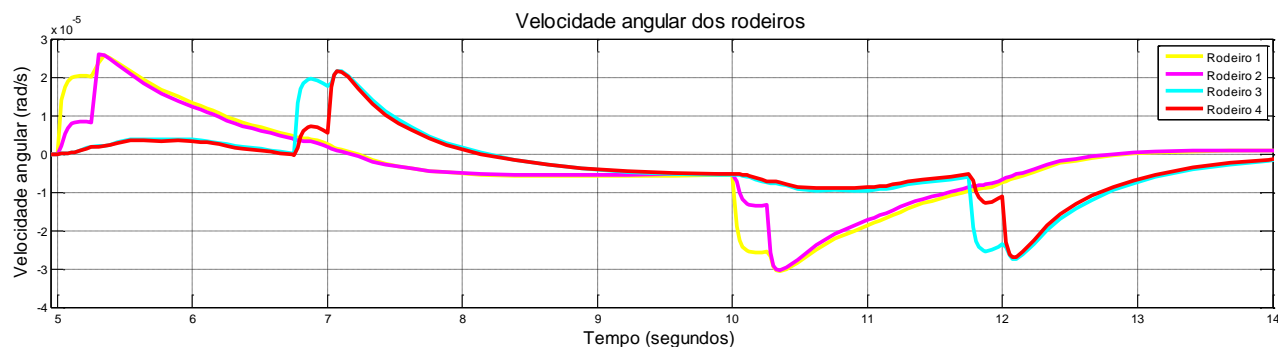


Figura 8. Velocidades angulares dos rodeiros.

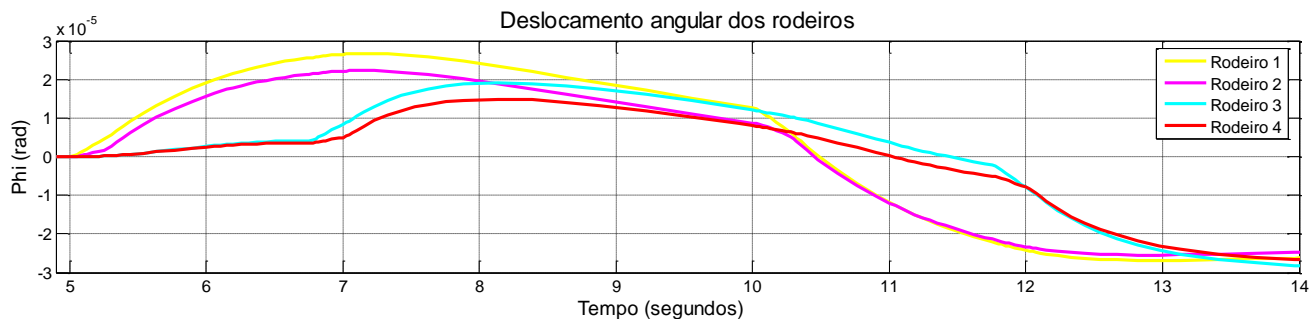


Figura 9. Deslocamentos angulares dos rodeiros.

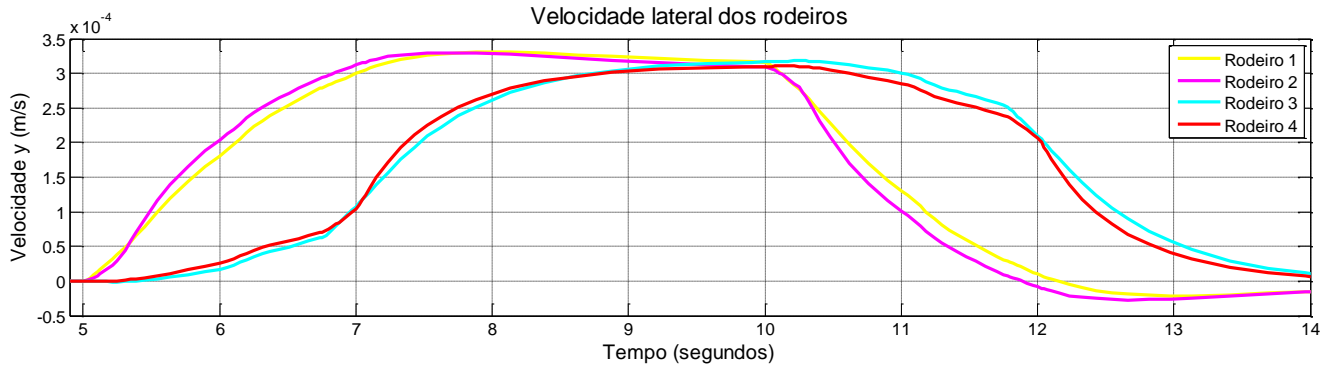


Figura 10. Velocidades laterais dos rodeiros.

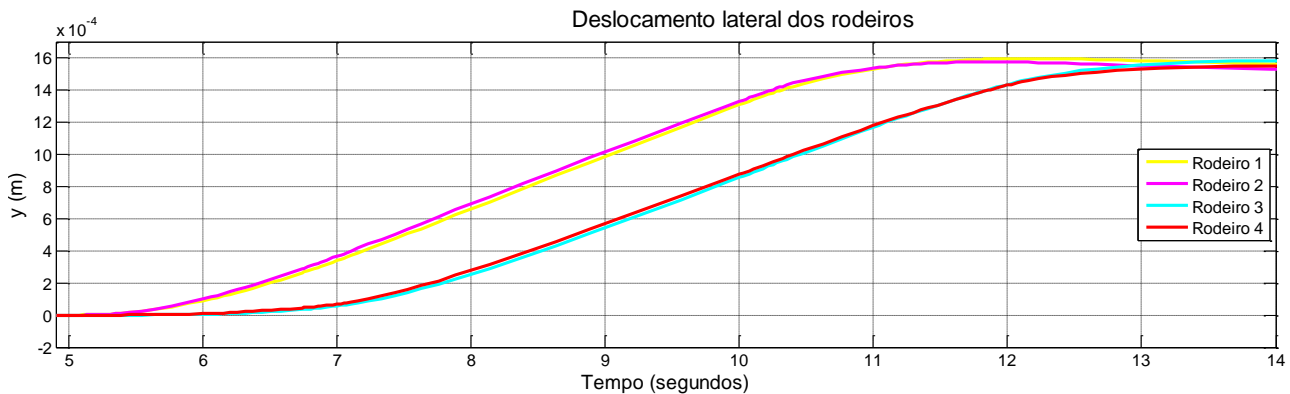


Figura 11. Deslocamentos laterais dos rodeiros.

A defasagem das forças centrípetas originadas no movimento curvilíneo pode ser observada claramente no gráfico da relação entre força lateral e vertical dos rodeiros. O primeiro rodeiro adentra o movimento com tempo de cinco segundos, quando pode ser visto no início do gráfico. Em seguida, entra em vigor a reação no segundo rodeiro no tempo de 5,25 segundos. Pode ser visto pela mudança na curva do primeiro e do segundo rodeiro. Após 1,75 segundos o segundo truque adentra o movimento. Agora os comportamentos então descritos ficam evidentes nas linhas de cor azul claro e vermelho, representando o terceiro e o quarto rodeiro, respectivamente.

Tabela 3. Defasagem dos rodeiros

Rodeiro	Defasagem
1	0
2	$2c/v_0 = 5,25s$
3	$2h/v_0 = 6,75s$
4	$(2c + 2c)/v_0 = 7s$

Seguindo-se com a simulação, obtêm-se os gráficos de outros parâmetros como velocidade lateral, velocidade angular, deslocamento lateral e deslocamento angular.

Como esperado, o modelo aqui estudado é estável. Assim, atinge o equilíbrio após 14 segundos, quando então suas velocidades zeram. Os deslocamentos atingem seus valores máximos e o sistema se apresenta em equilíbrio.

Os gráficos relativos ao vagão são desnecessários, pois a suspensão secundária atenua de forma considerável os efeitos dinâmicos dos rodeiros. Assim, nada se pode medir no vagão que apresente claramente os efeitos do fenômeno em questão.

6. Conclusão

Partindo-se dos gráficos acima, analisou-se, entre todas as variáveis do sistema, qual poderia apresentar relação causa-efeito. Ou seja, para prever o fenômeno de descarrilamento, qual variável identifica a situação de risco simultâneo de sua ocorrência. Os deslocamentos, tanto o angular quanto o lateral, apresentam comportamento semelhante e que não permite identificar nenhum tipo de variação considerável para prever a situação de risco. A velocidade lateral não apresenta picos

distintos, sendo seu comportamento semelhante àquele do deslocamento lateral. Assim não pode ser utilizada para ser correlacionada com as forças.

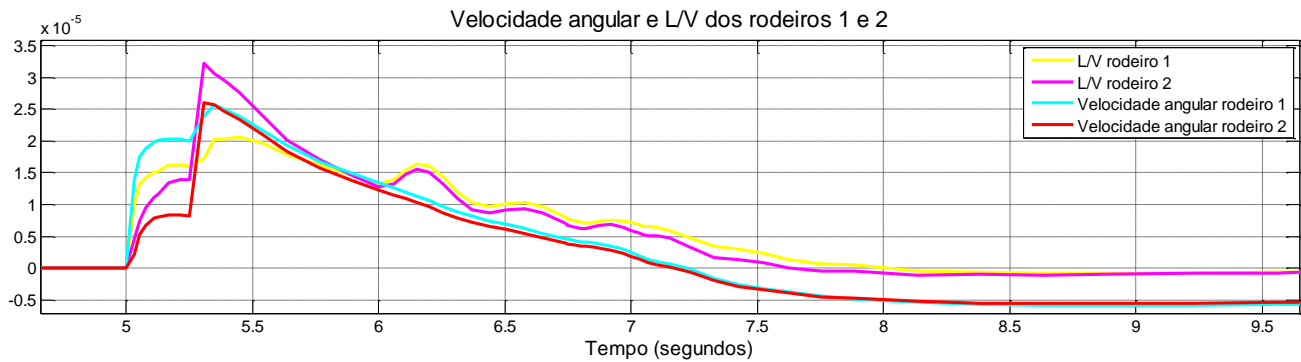


Figura 12. Velocidade angular e L/V dos rodeiros 1 e 2.

Porém, nota-se que as velocidades angulares dos rodeiros (*yaw*) apresentam um pico em fase com o pico máximo da relação entre as forças laterais e verticais. Isso significa que se um sensor de velocidade angular for instalado no rodeiro, o seu valor pode ser usado para detectar tendência de descarrilamento.

Cabe aqui considerar que esta é uma análise preliminar. O modelo em questão considera apenas a dinâmica lateral do vagão e, uma vez que os graus de liberdade relativos ao movimento vertical não foram considerados, podem incorrer em grandes variações. Isso porque a força vertical foi considerada como apenas àquela da força peso. Sabe-se que a dinâmica vertical de um veículo ferroviário é extremamente importante pois a interação presente entre a dinâmica vertical e a dinâmica lateral pode mudar significativamente a posição e a amplitude dos picos, mudando, desta forma, a identificação de situação limite. (Hung, C. et ali)

O resultado aqui obtido identificou um parâmetro diretamente mensurável do veículo e que pode ser correlacionado com índices de segurança. Considera-se então satisfatório o resultado deste trabalho que indica uma correlação entre a velocidade angular no rodeiro com a relação força lateral e força vertical.

A análise do modelo linear permitiu a identificação de um parâmetro de correlação. Sabe-se porém, que a força vertical possui dinâmica distinta da apresentada neste trabalho. Assim, um modelo com dinâmica completa do vagão e inclusão de não linearidades do modelo físico deve ser considerado em trabalhos futuros, grantindo assim maior precisão e possibilidade de identificação de outros parâmetros de correlação.

7. Referências

- WICKENS, A.H. . **Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics**. Lisse, Holanda; 2003.
- IWNICKI, Simon (Org). **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. Boca Raton, EUA; 2006.
- BARBOSA, R. S.. **Aplicação de Sistemas Multicorpos na Dinâmica de Veículos Guiados**. São Paulo: USP, 1999. 296 p. Tese (Doutorado) – Doutorado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- CONSOLI, Luciano R. P.. **Análise do comportamento dinâmico lateral de um veículo ferroviário**. São Paulo: USP, 158 p. Tese (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CUNHA, Pollyana G.. **Análise dinâmica de pontes ferroviárias: Uma metodologia simplificada**. São Paulo: USP, 2011. 88 p. Tese (Mestrado) – Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CALIL, Marcel L.. **Estudo de análise de conforto vibracional de vagão de passageiros**. São Paulo: USP, 2005. 68 p. Tese (Graduação) – Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BARBOSA, R. S.. **A 3D contact force safety criterion for flange climb derailment of a railway wheel**. Inglaterra: Taylor&Francis, 1994 - . Volume 42.
- BARBOSA, R. S. **Safety of a railway wheelset - derailment simulation with increasing lateral force**. **Vehicle System Dynamics**, p. 1-18, 2009. Inglaterra: Taylor&Francis, 1994 - . Volume 47.
- BARBOSA, R. S., Neto, A. C., **Dinâmica do rodeiro ferroviário**. São Paulo, Brasil: Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, 1996 - .

HUNG, C., Suda, Y., Aki, M., Tsuji, T. Morikawa, M., Yamashita, T., Kawanabe, T., Kunimi, T.. **Study on detection of the early signs of derailment for railway vehicles**. Inglaterra: Taylor&Francis, 1994 - . Volume 48.
STEAM TRAIN ANNIVERSARY BEGINS. Wales: BBC News, 1997- , acessado em 16 de setembro de 2011.
ANTT. **Transporte Ferroviário**. Disponível em:<http://www2.transportes.gov.br/Site%20BIT/02.2-Top%20Ferrovi%C3%A1rio/ferro.html> Acesso em: 17 set. 2011.
OKAMOTO, Isao. **Railway technology today 5: How Bogies Work**. Japão: 1998. Disponível em: <http://www.jrtr.net/jrtr18/pdf/f52_technology.pdf> Acesso em: 17 set. 2011.
T., Lewis M. J. . **Railways in the Greek and Roman World**. Hull, Inglaterra: 1997. Disponível em: <http://www.sciencenews.gr/docs/diolkos.pdf> Acesso em: 17 set. 2011.
UIC. **Activities Reports**. 2010. Paris, França: 2010. Disponível em: http://www.uic.org/IMG/pdf/_uic-ra-2010a.pdf Acesso em: 18 set. 2011.

IDENTIFICATION OF CO-RELATIONAL PARAMETERS RELATING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A RAILWAY VEHICLE AND SAFETY COEFFICIENTS

Botelho, R. C. B.
rcbbotelho@gmail.com

Barbosa, R. S.
spinola@usp.br

Abstract. The present work is a study about the dynamic behavior of a railroad vehicle when subject to a curve. It investigates parameters that could be co-related to a safety index identifying the possibility of derailment. Based on a bi-dimensional model of the vehicle with a railway wheel set model proposed by [8], considering two degrees of freedom, those being rotation with respect to the Z axis and displacement on the y axis. The simulation is carried out and the results are used to identify possible parameters from the vehicle that related to the safety index can demonstrate a cause-effect relation. The final part of the article indicates possible positioning for the sensors onboard the vehicle and improvements to the model.

Keywords: *derailment, train, dynamic, behavior, safety*